

文章编号:1673-2049(2011)02-0032-06

高层建筑结构随机风速场的数值模拟及风振控制

汪 权,王建国,张鸣祥

(合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:基于 Davenport 脉动风速谱,并考虑竖向相关性、平稳性的多变量随机过程,采用经过快速傅里叶变换算法改进的谐波叠加法对高层建筑结构进行脉动风速时程模拟,生成具有随机性的脉动风速时程曲线和风速功率谱密度函数。以 76 层 306 m 高钢筋混凝土结构风振 Benchmark 模型为研究对象,通过改进的谐波叠加法得出了结构在模拟脉动风荷载作用下的被动 TMD 控制和主动 LQG 控制的控制结果。研究表明:经过快速傅里叶变换算法改进的谐波叠加法具有很高的计算精度和效率。

关键词:脉动风;随机风速场;谐波叠加法;数值模拟;高层建筑;风振控制

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

Numerical Simulation of Stochastic Wind Velocity Field and Wind Vibration Control of High-rise Building Structures

WANG Quan, WANG Jian-guo, ZHANG Ming-xiang

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: Based on the weighted amplitude wave superposition (WAWS) method improved by fast Fourier transform (FFT) algorithm, the time history curves of stochastic fluctuating wind velocity and power spectrum density function were simulated by using the Davenport wind velocity spectrums and considering vertical correlation, stationary multivariate stochastic process. A 76-story 306 m reinforced concrete structure of Benchmark vibration model was studied. The numerical results of the dynamic response of the structure passive TMD control and active LQG control under simulation fluctuating wind loads were given. Research results show that the weighted amplitude wave superposition method improved by fast Fourier transform algorithm has good calculated accuracy and efficiency.

Key words: fluctuating wind; stochastic wind velocity field; weighted amplitude wave superposition method; numerical simulation; high-rise building; wind vibration control

0 引言

现代高层建筑和高耸结构的固有频率接近强风的频率,加剧了结构风激振动的响应。风荷载已成

为建筑结构设计的主要水平荷载和结构破坏的主要控制荷载。随着计算机技术的飞速发展,随机风荷载的数值模拟技术得到不断的改进。随机风荷载的数值模拟方法有 AR 法^[1-4]、ARMA 法^[5]、谐波叠加

收稿日期:2011-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(10572046)

作者简介:汪 权(1981-),男,安徽合肥人,讲师,工学博士,E-mail:wquan2005@sina.com。

(WAWS)法^[6-7]和 Monte Carlo 法等。时域模型的研究一直是随机过程模拟的重要内容,通过时域分析可以获得幅值域及频域的信息,时域模拟就是通过已知的频域信息重现时程样本。

本文中笔者采用经过快速傅里叶变换(FFT)算法改进的谐波叠加法,根据 Davenport 脉动风速谱^[8]的经验公式对随机风速场的脉动风部分进行数值模拟,形成具有随机性、时间相关性、空间相关性的风速时程曲线和结构风振控制的外扰力。将得到的风荷载时程作用在 76 层的 Benchmark 模型上进行了风振控制响应的仿真分析。研究了风荷载作用下高层建筑动力响应的控制方法,给出了高层建筑在模拟脉动风荷载作用下的被动 TMD 控制^[9]和主动 LQG 控制^[10-11]的控制结果。

1 脉动风荷载时程曲线的模拟

谐波叠加法是采用一系列余弦函数序列来模拟随机过程的一种离散化数值模拟方法。随机信号可以通过离散 FFT,分解为一系列具有不同频率和幅值的谐波,谱密度等于由带宽划分的一系列谐波幅值的平方。

考虑一组 m 个 n 维随机过程 $v_j(t)$, $j=1,2,\dots,m$, 其谱密度函数矩阵 $S(\omega)$ 为

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} s_{11}(\omega) & s_{12}(\omega) & \cdots & s_{1n}(\omega) \\ s_{21}(\omega) & s_{22}(\omega) & \cdots & s_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{n1}(\omega) & s_{n2}(\omega) & \cdots & s_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $s_{ii}(\omega)$ 为自功率谱密度函数; $s_{ij}(\omega)$ 为互功率谱密度函数, $i \neq j$; ω 为角频率。

因为风速的互相关函数是非对称的,既非偶函数,又非奇函数,所以一般互功率谱密度函数可写成复数形式,即

$$s_{ij}(\omega) = |s_{ij}(\omega)| e^{i\Psi(\omega)} = \sqrt{s_{ii}(\omega)s_{jj}(\omega)} \text{coh}(\omega) e^{i\Psi(\omega)} \quad (2)$$

式中: $\text{coh}(\omega)$ 为相关函数; $\Psi(\omega)$ 为互功率谱的相位角。

本文中采用 Davenport 脉动风速谱,相关函数 $\text{coh}(f)$ 可写成

$$\text{coh}(f) = \exp\{[-2f(C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2)^{1/2}]/(\bar{v}_i + \bar{v}_j)\} \quad (3)$$

式中: (x_i, z_i) 、 (x_j, z_j) 为迎风面上的两点坐标; C_x 、 C_z 为空间相关性衰减速度的参数,建议取 $C_x = 16$, $C_z = 10$; \bar{v}_i 、 \bar{v}_j 分别为点 i 、 j 的平均风速; f 为频率。

定义 $\omega^* = \frac{\omega \Delta z}{2\pi v(z)}$, Δz 为高差, $v(z)$ 为风速,则互功率谱的相位角 $\Psi(\omega)$ 可写成

$$\Psi(\omega) = \begin{cases} \frac{\omega \Delta z}{8v(z)} & \omega^* \leq 0.1 \\ -\frac{5\omega \Delta z}{v(z)} + 1.25 & 0.1 < \omega^* \leq 0.125 \\ [-\pi, \pi] \text{ 之间随机数} & \omega^* > 0.125 \end{cases} \quad (4)$$

根据 Shinozuka 理论,随机过程样本可以采用式(5)来模拟,即

$$v_j(t) = \sum_{k=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jk}(\omega_l)| \sqrt{2\Delta\omega} \cos[\omega_l t + \Psi_{jk}(\omega_l) + \theta_{kl}] \quad j=1,2,\dots,m \quad (5)$$

式中: $\Delta\omega$ 为角频率增量, $\Delta\omega = \omega_{up}/N$, ω_{up} 为截止频率; ω_l 为频域的递增变量, $\omega_l = l\Delta\omega$; $H_{jk}(\omega_l)$ 为谱密度函数矩阵 $S(\omega)$ 的 Cholesky 分解; $\Psi_{jk}(\omega_l)$ 为 2 个不同作用点之间的相位角,按式(4)计算; θ_{kl} 为均匀分布的随机数, $0 < \theta_{kl} < 2\pi$; t 为时间。

为避免模拟结构的失真, N 应取一个充分大的正整数,并把风谱带宽在频率范围内划分成 N 个相等的部分。通过给出的脉动风功率谱密度函数,就可以计算出满足目标功率谱要求的一个时程样本,为避免高频部分被过滤掉,时间步长 Δt 应满足 $\Delta t \leq \pi/\omega_{up}$ 。当模拟的点数大于 200 时,计算将十分耗时,需要引入 FFT 算法来提高计算效率。运用 FFT 算法,取 $M = 2\pi/(\Delta\omega\Delta t)$ 为整数,则可将式(5)改写为

$$v_j(q\Delta t) = \sqrt{2\Delta\omega} \text{Re}\{G_j(q\Delta t) \exp[i(q\pi/M)]\} \quad q=0,1,\dots,M-1; j=1,2,\dots,M \quad (6)$$

$$G_j(q\Delta t) = \sum_{l=0}^{M-1} B_j(l\Delta\omega) \exp(\frac{i2\pi lq}{M}) \quad (7)$$

$$B_j(l\Delta\omega) = \begin{cases} \sum_{k=1}^j H_{jk}(l\Delta\omega) \exp(i\Psi_{jk}) & 0 \leq l \leq N \\ 0 & N < l \leq M \end{cases} \quad (8)$$

$G_j(q\Delta t)$ 为 $B_j(l\Delta\omega)$ 的逆傅里叶变换,因此可用 FFT 算法使其计算简化。

本文中模拟风谱采用 Davenport 脉动风速谱,即有

$$S_{ii}(f) = 4K' \bar{v}_{10}^2 \frac{x'^2}{f(1+x')^{4/3}} \quad (9)$$

式中: x' 为湍流积分尺度系数, $x' = 1.200f/\bar{v}_{10}$; $S_{ii}(f)$ 为脉动风速功率谱密度; K' 为地面粗糙度系数; \bar{v}_{10} 为距地面 10 m 高度处的平均风速。

平均风速沿高度变化的规律采用对数率模型来表示,即

$$\frac{\bar{v}_z}{\bar{v}_{10}} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(10/z_0)} \quad (10)$$

式中: \bar{v}_z 为高度 z 处的平均风速; z_0 为地面粗糙度。

2 风振控制模型

2.1 LQG 最优控制算法

对于一个 n 层的高层建筑, 风荷载作用下结构的运动方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} + \mathbf{E}\mathbf{u} \quad (11)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为结构的 $n \times n$ 维质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{X} 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别为结构相对于地面的位移向量、速度向量和加速度向量; \mathbf{F} 为脉动风荷载向量; \mathbf{u} 为控制力向量; \mathbf{E} 为控制力位置矩阵。

假设只能观测结构少数几层的绝对加速度和位移响应, 另外考虑输入噪声向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_1(t)$ 和量测噪声向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_2(t)$, 它们均为零均值 Gauss 白噪声过程。运动方程式(11)可用状态空间法转换为以下状态方程和观测输出方程, 即

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{Z}} &= \mathbf{A}\mathbf{Z} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon}_1(t) \\ \mathbf{Z}(0) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}_0\mathbf{A}\mathbf{Z} + \mathbf{C}_0\mathbf{B}\mathbf{u} + \boldsymbol{\varepsilon}_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: \mathbf{Z} 为状态向量, $\mathbf{Z} = (x_1, x_2, \dots, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n)^\top$, x_i 、 \dot{x}_i 分别代表每层的绝对位移和速度; \mathbf{Y} 为控制系统输出变量向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 为常数矩阵, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix}$, 其中 $\mathbf{0}$ 、 \mathbf{I} 分别为 $n \times n$ 维的零矩阵和单位矩阵, 所以该模型可以看作定常系数控制系统的最优控制问题; \mathbf{C}_0 为输出矩阵, 根据具体问题要求确定; \mathbf{D} 为脉动风荷载作用位置矩阵。

LQG 算法首先采用全状态反馈的 LQR 算法设计全状态反馈最优控制力 \mathbf{u} , $\mathbf{u} = -\mathbf{G}\mathbf{Z}$, \mathbf{G} 为连续状态方程的控制力反馈增益矩阵, 可在 MATLAB 中用 LQR 命令求解, 然后根据结构的观测输出, 采用 Kalman 滤波器估计结构的全部状态, 选取的目标函数 J_e 为

$$J_e = \mathbf{E}[(\mathbf{Z} - \hat{\mathbf{Z}})^\top (\mathbf{Z} - \hat{\mathbf{Z}})] \quad (13)$$

式中: $\hat{\mathbf{Z}}$ 为对状态 \mathbf{Z} 的估计。

由目标函数极小构造出 Kalman 滤波器和滤波器的增益矩阵 \mathbf{K}_e , 即

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{Z}}} &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{Z}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}_e(\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}) \\ \hat{\mathbf{Z}} &= \hat{\mathbf{Z}}_0 \\ \hat{\mathbf{Y}} &= \mathbf{C}_0\hat{\mathbf{Z}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由上述得到的控制力反馈增益矩阵 \mathbf{G} 和 Kal-

man 滤波器的增益矩阵 \mathbf{K}_e , 可以得到下述受控系统的状态方程和输出方程, 即

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{Z}} &= \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{G} - \mathbf{K}_e\mathbf{C}_0\mathbf{A} + \mathbf{K}_e\mathbf{C}_0\mathbf{B}\mathbf{G} + \\ &\quad \mathbf{K}_e\mathbf{Y} + \mathbf{D}\mathbf{F} \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}_0(\dot{\mathbf{Z}} - \mathbf{D}\mathbf{F}) \\ \mathbf{Z}(0) &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

2.2 TMD 控制算法

设一 n 层的高层建筑, TMD 设置于第 k 层, 结构受脉动风荷载作用, 则结构和 TMD 系统的运动微分方程^[12]分别为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}_{\text{tmd}} + \mathbf{F} \quad (16)$$

$$m_d\ddot{x}_d + c_d(\dot{x}_d - \dot{x}_k) + k_d(x_d - x_k) = 0 \quad (17)$$

式中: m_d 、 k_d 、 c_d 分别为 TMD 的质量、刚度和阻尼; x_d 为 TMD 相对于地面的位移; x_k 为第 k 层位移; \mathbf{F}_{tmd} 为控制力矩阵, $\mathbf{F}_{\text{tmd}} = (0, \dots, 0, k_d(x_d - x_k) + c_d(\dot{x}_d - \dot{x}_k), 0, \dots, 0)^\top$, 其中 $k_d(x_d - x_k) + c_d(\dot{x}_d - \dot{x}_k)$ 在第 k 列。

通过调整 TMD 系统的固有频率, 使其与结构的第 1 阶自振频率相同, 可以达到控制结构振动的目的^[13-19]。

3 算例分析

本文中选取的 Benchmark 模型取自拟在澳大利亚墨尔本建造的 76 层 306 m 高的钢筋混凝土塔式结构, 见图 1。该结构是由核心混凝土筒和外框架组成的框筒结构。结构平面呈方形, 在 2 个对角处有倒角, 结构总质量为 153×10^3 t, 总体积为 510×10^3 m³, 质量密度约为 $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。结构宽度为 42 m, 结构高宽比为 7.3, 属于风敏感性结构。内核心筒尺寸 21 m × 21 m, 外框架柱距 6.5 m。每层有 24 根柱子, 均匀分布于筒周边, 且在各层楼板处与高 0.9 m、宽 0.4 m 的箱形截面梁固定连接。混凝土抗压强度为 60 MPa, 弹性模量为 40 GPa, 柱尺寸、核心筒厚度及各楼层质量随高度变化。

采用有限元方法进行分析, 将结构看做竖向悬臂梁模型, 各层楼板质量之间采用经典的梁单元模型, 结构共有 76 个平动自由度和 76 个转动自由度, 进一步采用静力凝聚方法进行分析, 则结构模型只保留 76 个平动自由度。计算得到结构的前 5 阶自振频率分别为 0.160、0.765、1.992、3.790、6.395 Hz, 钢结构的阻尼比设定为 0.01, 缩聚的模型较好地保留了原结构的动力特性。

数值模拟得到的脉动风速时程是一个随机过程,

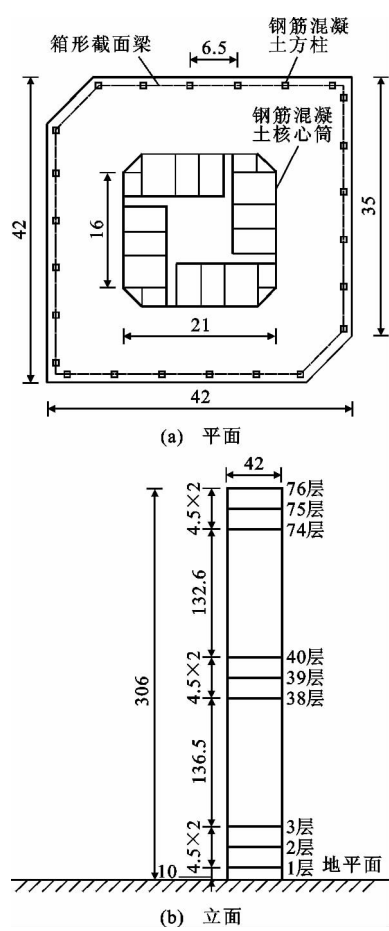


图 1 76 层 Benchmark 模型(单位:m)
Fig.1 76-story Benchmark Model (Unit:m)

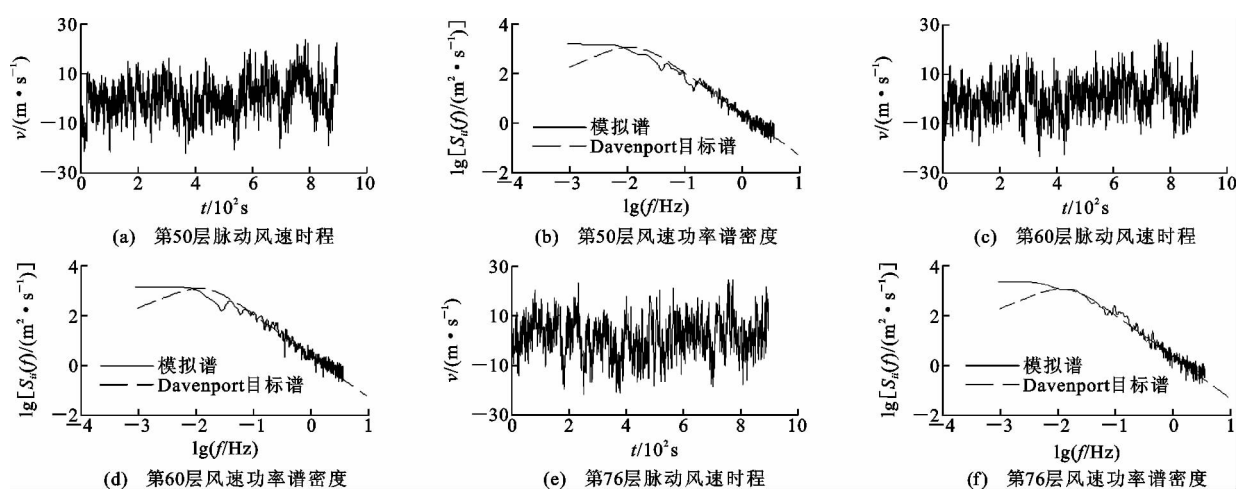


图 2 结构脉动风速时程及风速功率谱密度曲线

Fig.2 Curves of Fluctuating Wind Speed Time Histories and Wind Speed Power Spectrum Densities for Structures

频率相同,即0.160 Hz,阻尼比取 0.2;最优 LQG 控制中权矩阵 Q 、 R 的系数 α 、 β 分别取 1、0.03,假设在第 1、30、50、55、60、65、70、75、76 层位置安装传感器量测结构的速度和加速度响应, U_{\max} 为最优控制所需的最大控制力。

可以利用概率论和随机振动理论来分析。只要掌握几个统计数字特征,如均值、标准差等,便可以描述整个随机过程,而这些统计数字恰好可以用相关函数或功率谱密度来表示。验证一个模拟风谱正确与否,只需观察它的相关函数或功率谱密度与目标风谱是否相符。

利用谐波叠加法模拟 76 层 Benchmark 结构,仅考虑 76 个空间点的竖向相关性,其中模拟时间步长 $\Delta t=0.1\text{ s}$, $\bar{v}_{10}=15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $K'=0.03$,地面粗糙度 $z_0=0.4$,截止频率 $\omega_{\text{up}}=4\pi\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$,频率等分数为1 024, $C_z=10$,模拟时程 900 s,体型系数 $\mu_s=0.8$ 。图 2 中给出了该结构第 50、60、76 层的脉动风速时程曲线以及模拟风速的功率谱密度函数与 Davenport 目标谱的比较,可以看出,模拟谱在走势上和目标谱比较一致,所以利用经过 FFT 改进的谐波叠加法模拟风速是可行的。图 3 中给出了几个代表层模拟脉动风速的相关函数曲线。

图 4 中给出了无控制、被动 TMD 和主动 LQG 控制下结构模拟第 50、70 层位移响应的时程曲线。表 1 中给出了 76 层 Benchmark 结构模型在模拟脉动风荷载作用下的位移和加速度峰值响应以及结构在被动 TMD 控制和主动 LQG 控制下的峰值响应,其中 TMD 控制将一个 765 t 的质量块安装在顶层,将TMD系统的固有频率调整到与结构的第1阶自振

4 结 语

(1)谐波叠加法概念清晰,理论基础严密,适用范围广,但是计算效率不高。本文中笔者采用 FFT 算法改进的谐波叠加法实现了超高层建筑结构的随

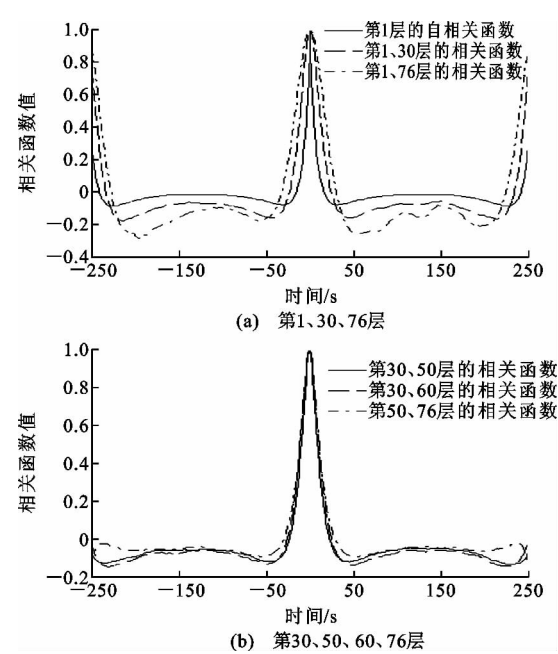


图 3 结构模拟脉动风速的相关函数曲线

Fig. 3 Correlation Function Curves of Structural Simulation Fluctuating Wind Speed

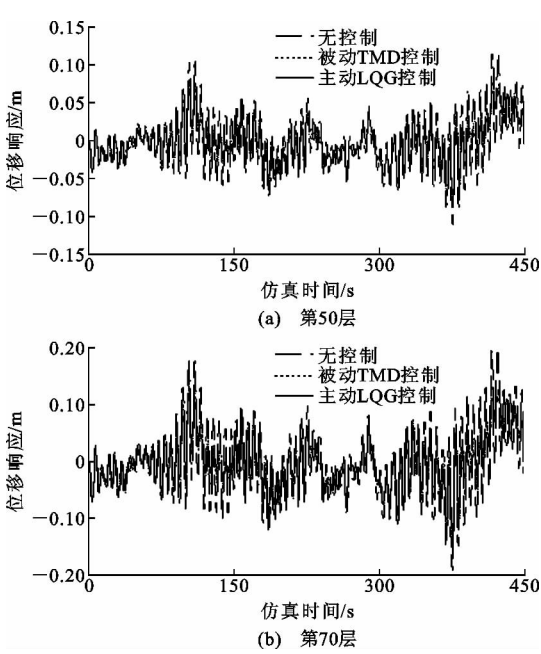


图 4 结构的位移响应时程曲线

Fig. 4 Time History Curves of Structural Displacement Responses

表 1 改进 WAWS 法作用下 Benchmark 模型风振控制峰值响应

Tab. 1 Peak Responses of Wind Vibration Control Benchmark Model Under Improved WAWS Method

| 结构层数 | | 1 | 30 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 76 |
|-----------|--|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 无控制 | x/cm | 0.036 3 | 4.666 4 | 11.432 7 | 13.426 0 | 15.487 9 | 17.610 2 | 19.764 1 | 21.996 7 | 22.497 1 |
| | $\ddot{x}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$ | 0.726 8 | 6.407 7 | 8.658 3 | 10.771 7 | 11.318 2 | 15.300 5 | 15.147 2 | 19.366 0 | 21.106 7 |
| 被动 TMD 控制 | x/cm | 0.029 4 | 3.736 8 | 8.949 3 | 10.438 9 | 11.970 8 | 13.540 1 | 15.129 8 | 16.777 5 | 17.146 8 |
| | $\ddot{x}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$ | 0.732 6 | 5.176 2 | 6.883 9 | 8.435 3 | 8.529 9 | 12.023 8 | 11.071 9 | 14.680 4 | 16.684 4 |
| 主动 LQG 控制 | x/cm | 0.025 2 | 3.212 8 | 7.717 7 | 9.007 4 | 10.334 9 | 11.697 1 | 13.079 6 | 14.513 9 | 14.835 4 |
| | $\ddot{x}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$ | 0.722 1 | 3.284 3 | 5.330 7 | 7.211 9 | 6.999 5 | 10.175 1 | 8.539 2 | 10.050 4 | 13.771 5 |

注：主动 LQG 控制中 $U_{\max}=109.5\text{ kN}$ 。

机脉动风速场的数值模拟,对高层、大跨、桥梁的风荷载模拟均可适用。结合 FFT 算法,可在保障计算精度的基础上,大大提高运算效率。

(2)算例仅考虑了顺风向脉动风对结构顺风向振动的影响,而没有计入建筑物的质心、刚心与几何形心的偏心、平扭耦合振动及建筑物体型等对风振动力反应的影响。由仿真结果可以看出,风振模型主动 LQG 控制的控制效果明显,位移控制效果可达 30%~34%,加速度控制效果可高达 40%~47%,而被动 TMD 控制的位移控制效果可达 24%~33%,加速度控制效果可达 19%~27%。

参考文献:

References:

[1] IWATANI Y. Simulation of Multidimensional Wind Fluctuations Having Any Arbitrary Power Spectra

and Cross-spectra[J]. Journal of Wind Engineering, 1982,11(1):5-18.

[2] LAZZARI M, SAETTA A V, VITALIANI R V. Non-linear Dynamic Analysis of Cable-suspended Structures Subjected to Wind Actions[J]. Computers and Structures,2001,79(9):953-969.

[3] IANNUZZI A, SPINELLI P. Artificial Wind Generation and Structural Response[J]. Journal of Structural Engineering,1987,113(12):2382-2398.

[4] 刘锡良,周颖. 风荷载的几种模拟方法[J]. 工业建筑,2005,35(5):81-84.

LIU Xi-liang, ZHOU Ying. Numerical Simulation Methods of Wind Load[J]. Industrial Construction, 2005,35(5):81-84.

[5] LI Y, KAREEM A. ARMA Systems in Wind Engineering[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1990, 5(2):49-59.

- [6] 王之宏. 风荷载的模拟研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 44-52.
WANG Zhi-hong. Simulation of Wind Loading[J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(1): 44-52.
- [7] 曹映泓, 项海帆, 周 颖. 大跨度桥梁随机风场的模拟[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 72-79.
CAO Ying-hong, XIANG Hai-fan, ZHOU Ying. Simulation of Stochastic Wind Field on Long-span Bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 72-79.
- [8] 黄本才, 汪丛军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 2版. 上海: 同济大学出版社, 2008.
HUANG Ben-cai, WANG Cong-jun. Principle and Application of Structural Wind Resistance Analysis[M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2008.
- [9] 欧进萍. 结构振动控制——主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 438-448.
OU Jin-ping. Structural Vibration Control—Active, Semi-active and Intelligent Control[M]. Beijing: Science Press, 2003: 438-448.
- [10] LU L T, CHIANG W L, TANG J P, et al. Active Control for a Benchmark Building Under Wind Excitations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(4): 469-493.
- [11] ZHANG J, ROSCHKE P N. Active Control of a Tall Structure Excited by Wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/2/3): 209-223.
- [12] RICCIARDELLI F, OCCHIUZZI A, CLEMENTE P. Semi-active Tuned Mass Damper Control Strategy for Wind-excited Structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 88(1): 57-74.
- [13] 刘 鸣, 李世翠, 刘伯权. 高层建筑抗震设计振型数目选取原则[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(4): 73-76.
LIU Ming, LI Shi-cui, LIU Bo-quan. Criterion of Mode Number Selection in Seismic Design for High-rise Building Structures[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 73-76.
- [14] 李志强, 王 元, 张鸿雁. 正弦波动来流条件下复杂结构建筑表面风压分布[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(2): 246-251.
LI Zhi-qiang, WANG Yuan, ZHANG Hong-yan. Analysis on Surface Wind-pressure of Complex Structures Under Sinusoidal Inflow[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(2): 246-251.
- [15] 姚继涛, 刘金华, 吴增良. 既有结构抗力的随机过程概率模型[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4): 445-449.
YAO Ji-tao, LIU Jin-hua, WU Zeng-liang. Model for Stochastic Resistance of Existing Structures[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 445-449.
- [16] 李加武, 张宏杰, 韩万水. 斜拉桥风致响应的雷诺数效应[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 42-47.
LI Jia-wu, ZHANG Hong-jie, HAN Wan-shui. Wind-induced Response of Cable-stayed Bridge with Consideration of Reynolds Number Effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 42-47.
- [17] 张 伟, 葛耀君. 导流板对大跨桥梁风振响应影响的流场机理[J]. 中国公路学报, 2009, 22(3): 52-57.
ZHANG Wei, GE Yao-jun. Flow Field Mechanism of Wind Induced Vibration Response of Large Span Bridge Influenced by Guide Vanes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 52-57.
- [18] 王爱勤, 李龙安. 公路大跨度桥梁抗风性能评价方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 58-61, 73.
WANG Ai-qin, LI Long-an. Evaluation Method of Wind-resistance Capability of Large-span Bridge on Highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 58-61, 73.
- [19] 李 薇, 胡兆同, 李加武. CFD方法研究桥梁断面三分力系数的雷诺数效应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 44-49.
LI Wei, HU Zhao-tong, LI Jia-wu. Reynolds Number Effect of Three Component Coefficients in Bridge Deck Using Computational Fluid Dynamics (CFD)[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 44-49.